

中国小麦品种黄色素含量基因等位变异分子检测 及其分布规律研究

杨芳萍^{1,2,4}, 何心尧², 何中虎^{2,3}, 尚勋武⁴, 杨文雄¹, 夏先春²

(¹甘肃省农业科学院作物研究所, 兰州 730070; ²中国农业科学院作物科学研究所, 国家小麦改良中心/国家农作物基因资源与基因改良重大科学工程, 北京 100081; ³CIMMYT 中国办事处, 北京 100081; ⁴甘肃农业大学农学院, 兰州 730070)

摘要:【目的】八氢番茄红素合成酶 (phytoene synthase, *Psy*) 基因是影响小麦黄色素含量的关键基因, 利用分子标记检测中国冬小麦品种 (系) *Psy-A1* 基因的等位变异及其与黄色素含量的关系, 进一步验证 *Psy-A1* 基因分子标记的有效性。【方法】利用 7A 染色体上 *Psy-A1* 基因的分子标记 *YP7A* 检测该基因在中国 217 份冬小麦品种 (系) 中的等位变异, 分析不同等位变异与黄色素含量的相关性及其变化趋势。【结果】*Psy-A1* 基因标记 *YP7A* 为共显性标记, 在高、低黄色素含量的小麦材料中分别扩增出 194 bp 和 231 bp 片段, 相应的等位基因为 *Psy-A1a* 和 *Psy-A1b* (GenBank 编号分别为 EF600063 和 EF600064)。在 217 份冬小麦品种 (系) 中, 含有等位基因 *Psy-A1a* 和 *Psy-A1b* 的品种 (系) 分别占 62.2% 和 37.8%, 二者黄色素含量平均值差异达到极显著水平 ($P < 0.01$)。其中, 北方冬麦区、黄淮冬麦区、长江中下游冬麦区及西南冬麦区 *Psy-A1a* 等位基因的分布频率分别为 75.0%、72.0%、25.9% 和 33.3%。【结论】分子标记 *YP7A* 可以作为小麦品种黄色素含量选择的辅助工具。

关键词: 普通小麦; 黄色素; 八氢番茄红素合成酶基因; 功能标记; 分子标记辅助选择

Molecular Detection and Distribution of Allelic Variations of a Gene for Yellow Pigment Content in Chinese Winter Wheat Cultivars

YANG Fang-ping^{1,2,4}, HE Xin-yao², HE Zhong-hu^{2,3}, SHANG Xun-wu⁴, YANG Wen-xiong¹, XIA Xian-chun²

(¹Crop Research Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, Gansu; ²Institute of Crop Science, National Wheat Improvement Center/The National Key Facility for Crop Gene Resource and Genetic Improvement, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081; ³CIMMYT China Office, Beijing 100081; ⁴College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu)

Abstract: 【Objective】 Phytoene synthase (*Psy*) gene is a critical gene influencing biosynthetic pathway of yellow pigment (YP) in common wheat. The aims of this study were to detect the allelic variations of *Psy-A1* gene in 217 Chinese winter wheat cultivars and lines using the functional marker *YP7A* developed from the sequence polymorphisms of *Psy-A1* gene on chromosome 7A, and to investigate the association between YP content and allelic variations of *Psy-A1* gene to evaluate the feasibility of the marker for selecting wheat cultivars with either low or high YP content. 【Method】 Allelic variations of 217 Chinese winter wheat cultivars from different wheat regions were detected using *YP7A*. The association between allelic variations of *Psy-A1* gene and YP content were investigated. 【Result】 *YP7A*, a co-dominant marker of *Psy-A1* gene, can amplify a 194-bp and a 231-bp fragment in the genotypes with *Psy-A1a* frequently for high YP content and *Psy-A1b* mostly for low YP content, respectively. Highly significant differences in YP content were detected between the genotypes with *Psy-A1a* and those with *Psy-A1b* ($P < 0.01$). The occurrence frequencies for *Psy-A1a* and *Psy-A1b* were 62.2% and 37.8% in the 217 cultivars, respectively. Significant differences of allelic variations were found in wheat cultivars from different wheat regions of China. In the Northern Winter Wheat Region, Yellow & Huai Winter Wheat Region, the Middle & Lower reaches of the Yangtze River Winter Wheat Region and Southwestern Winter Wheat

收稿日期: 2007-07-05; 接受日期: 2007-09-30

基金项目: 国家“863”项目 (2006AA10Z1A7 和 2006AA100102), “973”基础研究 (2002CB111300) 和国家“十一五”科技支撑计划 (2006BAD01A02-29)

作者简介: 杨芳萍 (1969-), 女, 甘肃甘谷人, 副研究员, 研究方向为小麦遗传育种研究。通讯作者夏先春 (1963-), 男, 安徽六安人, 研究员, 博士, 研究方向为小麦遗传育种。Tel: 010-68918610; Fax: 010-68918547; E-mail: xiexianchun@caas.net.cn

Region, frequencies of the allele *Psy-A1a* were 75.0%, 72.0%, 25.9% and 33.3%, respectively. 【Conclusion】 The molecular marker *YP7A* exhibits the characteristics of high efficiency and reliability in evaluating YP content, and can be used as a molecular tool for marker-assisted selection (MAS) in wheat breeding programs targeting for either low or high YP content.

Key words: Common wheat (*Triticum aestivum* L.); Yellow pigment (YP); Phytoene synthase (*Psy*) gene; Functional marker; Marker-assisted selection (MAS)

0 引言

【研究意义】小麦籽粒黄色素含量对面条、馒头等食品的外观品质有重要影响。日本和东南亚国家消费的黄碱面条要求亮黄色，高黄色素含量有利于提高其外观品质，澳大利亚等国已将提高黄色素含量作为重要育种目标^[1]。然而，中国小麦制品面条、馒头等要求较高白度，需要亮度好、黄色素含量低的面粉，因此，研究控制小麦黄色素含量基因的等位变异、选育低黄色素含量的小麦品种是中国品质育种的重要目标。【前人研究进展】许多研究报道小麦籽粒黄色素含量与面制品颜色高度相关。黄色素与面粉、面团黄度的相关系数高达 0.8~0.9^[2,3]，与面包和面条颜色的相关系数分别为 0.69 和 0.76^[4,5]。品种间黄色素含量可相差 3~4 倍，选择潜力大^[6,7]。虽然环境对黄色素含量有一定影响^[8]，但基因型是影响黄色素含量的主要因素。Parker 等^[7]对 Schomburgk/Yarralinka 的 150 个 SSD 系分析表明，黄色素含量的遗传力为 0.67。在硬粒小麦中黄色素含量的遗传力更高，Clarke 等^[9]研究显示其遗传力为 0.88~0.95。近年来对于影响小麦黄色素含量基因的定位取得了很大进展，许多研究结果显示第 7 同源群特别是 7A 和 7B 染色体上的基因对籽粒黄色素含量的作用较大。Parker 等^[7]在 Schomburgk/Yarralinka 的 150 个 SSD 系中定位了位于 7A 和 3A 染色体上的主效 QTL，可分别解释黄色素含量表型变异的 60%和 13%。Mares 和 Campbell^[10]对 Sunco/Tasman 的 DH 群体进行研究，发现了位于 7A 和 3B 染色体上的主效 QTL，可分别解释 27%和 20%的表型变异。张立平等^[11]在中优 9507/CA9632 的 DH 群体中发现了一个位于 7AL 上的主效 QTL，在不同环境中解释 12.9%~37.6%的表型变异。Kuchel 等^[12]利用两个澳大利亚小麦品种 Trident 和 Molineux 的 DH 后代分析控制面粉 *b** 的基因位点，表明位于 7B 染色体上的 QTL 在不同年度可解释 48%~61%的表型变异。Elouafi 等^[13]在硬粒小麦中定位了 3 个黄色素 QTL，其中 7BL 位点可解释 53%的表型变异，7AL 上的两个 QTL 的贡献率分别为 13%和 6%。Pozniak 等^[14]在硬粒小麦中

定位了 4 个 QTL，分别位于 2A、4B、6B、7B 上。此外，在第一同源群^[15]、4A、5A^[16]以及 2D、4D^[12]等染色体上也定位了一些 QTL。可见，黄色素含量受多个基因位点的调控，但位于第七同源群上的 QTL 效应最大。黄色素是由叶黄素、酯类、类胡萝卜素、含量极微的花色素和黄酮类化合物等多种物质组成的混合物，其主要成分是类胡萝卜素^[17]。八氢番茄红素合成酶 (phytoene synthase, *Psy*) 是植物类胡萝卜素合成途径中的限速酶，直接影响籽粒胚乳的颜色^[18]。He 等^[19]根据玉米的 *Psy1* 基因 (GenBank 编号: ZMU32636) 克隆了小麦 7A 染色体上的 *Psy1* 基因 (暂定名为 *Psy-A1*)，并依其 DNA 序列多态性开发了 *Psy-A1* 的功能标记 *YP7A*。【本研究切入点】He 等^[19]开发的功能标记 *YP7A* 能有效地区分小麦 7A 染色体上控制高、低黄色素含量的等位基因 *Psy-A1a* 和 *Psy-A1b*，为快速检测高、低黄色素含量的小麦品种 (系) 及其分布规律提供了可能。【拟解决的关键问题】利用 *YP7A* 标记对中国 217 份小麦品种 (系) 进行检测，明确中国冬小麦品种 *Psy-A1* 基因的等位变异及其与面粉黄色素含量之间的关系，筛选低黄色素含量的材料，进一步验证分子标记 *YP7A* 的有效性，为利用分子标记选择低黄色素含量小麦品种提供材料和方法。

1 材料与方法

1.1 供试材料

选用 217 份国内主要冬麦区的历史品种和当前主栽品种 (表 1)，其中北部冬麦区 48 份，黄淮麦区 118 份，长江中下游区 27 份，西南冬麦区 24 份，这些材料基本上反映了中国冬播麦区小麦生产和育种现状。2001~2002 和 2002~2003 年度材料种植于中国农业科学院棉花研究所 (河南安阳)，随机区组设计，3 次重复。田间管理均按常规方法进行，收获籽粒用于黄色素含量测定和分子标记检测。

1.2 黄色素含量测定

采取改进的 AACC14-50 法^[20]。称取样品 3 g，加入提取液水饱和正丁醇 15 ml，在往复式振荡机上振

表 1 中国冬小麦品种(系)黄色素含量及分子标记检测结果

Table 1 YP content and allelic variation in Chinese winter wheat cultivars

| 编号 Code | 品种 Cultivar | 来源 Origin | 等位 基因 Allele | 黄色素含量 YP content (mg·kg ⁻¹) | 编号 Code | 品种 Cultivar | 来源 Origin | 等位 基因 Allele | 黄色素含量 YP content (mg·kg ⁻¹) |
|------------|---------------------------|--------------|--------------------|---|------------|---------------------------|--------------|--------------------|---|
| 1 | 京冬 8 Jingdong 8 | 北京 Beijing | a | 2.1 | 43 | 冀 5066 Ji 5066 | 河北 Hebei | b | 0.8 |
| 2 | 京冬 10 号 Jingdong 10 | 北京 Beijing | a | 2.6 | 44 | 冀麦 38 Jimai 38 | 河北 Hebei | b | 1.1 |
| 3 | 京 411 Jing 411 | 北京 Beijing | a | 2.6 | 45 | 冀 Z76 Ji Z76 | 河北 Hebei | b | 1.4 |
| 4 | 京 9428 Jing 9428 | 北京 Beijing | a | 1.0 | 46 | 河北农大 341 Hebeinongda 341 | 河北 Hebei | a | 1.2 |
| 5 | 京农 98-100 Jingnong 98-100 | 北京 Beijing | a | 2.6 | 47 | 河农 2552 Henong 2552 | 河北 Hebei | a | 2.2 |
| 6 | 京农 97-86 Jingnong 97-86 | 北京 Beijing | a | 1.5 | 48 | 高优 503 Gaoyou 503 | 河北 Hebei | b | 1.6 |
| 7 | 京农 8318 Jingnong 8318 | 北京 Beijing | a | 2.3 | 49 | 鄂 86642 E 86642 | 湖北 Hubei | a | 0.6 |
| 8 | 农大 3213 Nongda 3213 | 北京 Beijing | a | 2.4 | 50 | 鄂 81027 E 81027 | 湖北 Hubei | b | 1.3 |
| 9 | 农大 3291 Nongda 3291 | 北京 Beijing | a | 3.2 | 51 | 鄂 91727 E 91727 | 湖北 Hubei | b | 1.1 |
| 10 | 农大 3197 Nongda 3197 | 北京 Beijing | a | 1.7 | 52 | 鄂 66378 E 66378 | 湖北 Hubei | b | 1.2 |
| 11 | 农大 3214 Nongda 3214 | 北京 Beijing | a | 2.0 | 53 | 淮麦 16 Huaimai 16 | 江苏 Jiangsu | b | 0.6 |
| 12 | 农大 3395 Nongda 3395 | 北京 Beijing | a | 2.3 | 54 | 淮麦 17 Huaimai 17 | 江苏 Jiangsu | a | 1.2 |
| 13 | 农大 116 Nongda 116 | 北京 Beijing | b | 1.2 | 55 | 淮麦 18 号 Huaimai 18 | 江苏 Jiangsu | a | 2.2 |
| 14 | 农大 152 Nongda 152 | 北京 Beijing | b | 1.7 | 56 | RF-1 | 江苏 Jiangsu | a | 1.9 |
| 15 | 农大 99-5009 Nongda 99-5009 | 北京 Beijing | b | 1.8 | 57 | 宁 9247 Ning 9247 | 江苏 Jiangsu | a | 1.9 |
| 16 | 小偃 54 Xiaoyan 54 | 北京 Beijing | b | 0.9 | 58 | 宁 9-159 Ning 9-159 | 江苏 Jiangsu | a | 2.0 |
| 17 | 原冬 107 Yuandong 107 | 北京 Beijing | a | 1.0 | 59 | 宁 97-18 Ning 97-18 | 江苏 Jiangsu | b | 0.3 |
| 18 | 原冬 6 号 Yuandong 6 | 北京 Beijing | a | 1.4 | 60 | 宁 97-41 Ning 97-41 | 江苏 Jiangsu | b | 1.1 |
| 19 | 原冬 9428 Yuandong 9428 | 北京 Beijing | a | 1.7 | 61 | 宁 99415-8 Ning 99415-8 | 江苏 Jiangsu | b | 1.4 |
| 20 | 原冬 8585 Yuandong 8585 | 北京 Beijing | a | 1.8 | 62 | 宁 98084 Ning 98084 | 江苏 Jiangsu | b | 1.6 |
| 21 | 原冬 971 Yuandong 971 | 北京 Beijing | a | 2.5 | 63 | 宁 9766 Ning 9766 | 江苏 Jiangsu | b | 0.9 |
| 22 | CA9553 | 北京 Beijing | a | 1.7 | 64 | 宁 9940 Ning 9940 | 江苏 Jiangsu | b | 1.0 |
| 23 | CA9719 | 北京 Beijing | a | 2.1 | 65 | 宁 9952 Ning 9952 | 江苏 Jiangsu | b | 1.4 |
| 24 | CA8686 | 北京 Beijing | a | 2.2 | 66 | 宁 9548 Ning 9548 | 江苏 Jiangsu | b | 0.9 |
| 25 | CA9648 | 北京 Beijing | a | 3.1 | 67 | 徐州 826 Xuzhou 826 | 江苏 Jiangsu | a | 2.9 |
| 26 | CA9641 | 北京 Beijing | a | 1.1 | 68 | 883 | 江苏 Jiangsu | a | 1.9 |
| 27 | 中优 9507 Zhongyou 9507 | 北京 Beijing | a | 1.5 | 69 | 徐 858 Xu 858 | 江苏 Jiangsu | b | 1.2 |
| 28 | 北京 837 Beijing 837 | 北京 Beijing | a | 1.6 | 70 | 9 (54) | 江苏 Jiangsu | b | 1.3 |
| 29 | 冬丰 9801 Dongfeng 9801 | 北京 Beijing | a | 1.7 | 71 | 徐州 25 号 Xuzhou 25 | 江苏 Jiangsu | b | 2.2 |
| 30 | CA9632 | 北京 Beijing | a | 2.0 | 72 | 扬 96-152 Yang 96-152 | 江苏 Jiangsu | a | 1.2 |
| 31 | CA9550 | 北京 Beijing | a | 2.1 | 73 | 扬麦 158 Yangmai 158 | 江苏 Jiangsu | b | 1.0 |
| 32 | 中麦 9 号 Zhongmai 9 | 北京 Beijing | a | 2.2 | 74 | 扬 96G25 Yang 96G25 | 江苏 Jiangsu | b | 1.2 |
| 33 | 中麦 16 号 Zhongmai 16 | 北京 Beijing | a | 2.5 | 75 | 扬麦 5 号 Yangmai 5 | 江苏 Jiangsu | b | 1.5 |
| 34 | CA9532 | 北京 Beijing | a | 2.6 | 76 | 99P102 | 江苏 Jiangsu | b | 1.6 |
| 35 | CA9722 | 北京 Beijing | a | 1.5 | 77 | 扬麦 9 号 Yangmai 9 | 江苏 Jiangsu | b | 1.8 |
| 36 | 冬丰 611 Dongfeng 611 | 北京 Beijing | a | 2.2 | 78 | 扬 97-65 Yang 97-65 | 江苏 Jiangsu | b | 1.2 |
| 37 | 中优 9701 Zhongyou 9701 | 北京 Beijing | b | 1.2 | 79 | 绵阳 980127 Mianyang 980127 | 四川 Sichuan | a | 1.1 |
| 38 | 沧核 030 Canghe 030 | 河北 Hebei | b | 1.8 | 80 | 绵阳 26 Mianyang 26 | 四川 Sichuan | a | 0.9 |
| 39 | 96C1 | 河北 Hebei | b | 1.2 | 81 | 绵阳 940112 Mianyang 940112 | 四川 Sichuan | b | 0.7 |
| 40 | HS97-10 | 河北 Hebei | b | 1.3 | 82 | 绵阳 98-20 Mianyang 98-20 | 四川 Sichuan | b | 1.2 |
| 41 | 冀 3475 Ji 3475 | 河北 Hebei | a | 2.0 | 83 | 绵阳 960107 Mianyang 960107 | 四川 Sichuan | b | 0.7 |
| 42 | 藁城 8901 Gaocheng 8901 | 河北 Hebei | a | 1.3 | 84 | 绵阳 99-17 Mianyang 99-17 | 四川 Sichuan | b | 1.3 |

续表 1 Continued from table 1

| 编号 Code | 品种 Cultivar | 来源 Origin | 等位 基因 Allele | 黄色素含量 YP content (mg·kg ⁻¹) | 编号 Code | 品种 Cultivar | 来源 Origin | 等位 基因 Allele | 黄色素含量 YP content (mg·kg ⁻¹) |
|------------|-------------------------|--------------|--------------------|---|------------|-------------------------------|--------------|--------------------|---|
| 85 | 绵阳 98-17 Mianyang 98-17 | 四川 Sichuan | b | 1.3 | 127 | 豫麦 25 号 Yumai 25 | 河南 Henan | a | 0.8 |
| 86 | R25 | 四川 Sichuan | b | 0.9 | 128 | 豫麦 49 号 Yumai49 | 河南 Henan | b | 1.6 |
| 87 | R57 | 四川 Sichuan | b | 1.2 | 129 | 豫麦 69 号 Yumai 69 | 河南 Henan | a | 1.7 |
| 88 | R59 | 四川 Sichuan | b | 1.3 | 130 | 豫麦 63 号 Yumai 63 | 河南 Henan | a | 1.2 |
| 89 | 川育 12 Chuanyu 12 | 四川 Sichuan | b | 0.8 | 131 | 豫麦 21 号 Yumai 21 | 河南 Henan | a | 1.5 |
| 90 | 川 89-107 Chuan 89-107 | 四川 Sichuan | b | 0.7 | 132 | 豫麦 51 号 Yumai 51 | 河南 Henan | a | 2.4 |
| 91 | 川 96003 Chuan 96003 | 四川 Sichuan | b | 0.8 | 133 | 周 91177 Zhou 91177 | 河南 Henan | a | 2.2 |
| 92 | 川 89-114 Chuan 89-114 | 四川 Sichuan | b | 1.3 | 134 | 周麦 13 号 Zhoumai 13 | 河南 Henan | a | 2.2 |
| 93 | 云麦 44 Yunmai 44 | 云南 Yunnan | a | 2.4 | 135 | 豫麦 70 号 Yumai 70 | 河南 Henan | a | 1.8 |
| 94 | 云麦 46 Yunmai 46 | 云南 Yunnan | a | 1.0 | 136 | 豫麦 35 号 Yumai 35 | 河南 Henan | a | 2.1 |
| 95 | 风麦 27 Fengmai 27 | 云南 Yunnan | a | 1.0 | 137 | 豫麦 34 号 Yumai 34 | 河南 Henan | a | 1.3 |
| 96 | 992-17 | 云南 Yunnan | a | 1.1 | 138 | 98 中 18 98 zhong 18 | 河南 Henan | a | 2.9 |
| 97 | 云麦 42 Yunmai 42 | 云南 Yunnan | a | 1.2 | 139 | 中育 5 号 Zhongyu 5 | 河南 Henan | a | 1.8 |
| 98 | 风麦 24 Fengmai 24 | 云南 Yunnan | a | 1.9 | 140 | 85 中 33 85 zhong 33 | 河南 Henan | a | 2.1 |
| 99 | 云麦 39 Yunmai 39 | 云南 Yunnan | b | 1.6 | 141 | 中育 6 号 Zhongyu 6 | 河南 Henan | a | 2.3 |
| 100 | 引 11-12 Yin 11-12 | 云南 Yunnan | b | 1.9 | 142 | 93 中 6(37) 93 zhong 6(37) | 河南 Henan | a | 2.0 |
| 101 | 德麦 4 号 Demai 4 | 云南 Yunnan | b | 1.4 | 143 | 鲁麦 21 Lumai 21 | 山东 Shandong | a | 1.8 |
| 102 | Y10-8 | 云南 Yunnan | b | 1.5 | 144 | 济宁 936098 Jining 936098 | 山东 Shandong | a | 2.3 |
| 103 | 安农 91168 Annong 91168 | 安徽 Anhui | a | 1.3 | 145 | 济麦 1 号 Jimai 1 | 山东 Shandong | a | 0.9 |
| 104 | 皖麦 38 Wanmai 38 | 安徽 Anhui | a | 1.7 | 146 | PH1521 | 山东 Shandong | a | 1.1 |
| 105 | 皖麦 18 Wanmai 18 | 安徽 Anhui | a | 0.7 | 147 | PH85-16 | 山东 Shandong | a | 1.1 |
| 106 | 皖麦 33 Wanmai 33 | 安徽 Anhui | b | 0.7 | 148 | 山农 617 Shannong 617 | 山东 Shandong | a | 1.6 |
| 107 | 安农 94022 Annong 94022 | 安徽 Anhui | b | 1.1 | 149 | 山农 664 Shannong 664 | 山东 Shandong | a | 2.8 |
| 108 | 皖麦 48 Wanmai 48 | 安徽 Anhui | b | 1.5 | 150 | 山农 1355 Shannong 1355 | 山东 Shandong | a | 3.4 |
| 109 | 皖麦 19 号 Wanmai 19 | 安徽 Anhui | b | 1.7 | 151 | 山农 990525 Shannong990525 | 山东 Shandong | a | 0.9 |
| 110 | 豫麦 54 号 Yumai 54 | 河南 Henan | a | 2.1 | 152 | PH85-1-1 | 山东 Shandong | a | 1.2 |
| 111 | 兰考 24 号 Lankao 24 | 河南 Henan | b | 2.0 | 153 | 山农 60182 Shannong 60182 | 山东 Shandong | b | 0.9 |
| 112 | 豫农 94268 Yunong 94268 | 河南 Henan | a | 2.4 | 154 | 山农 2013 Shannong 2013 | 山东 Shandong | b | 1.8 |
| 113 | 豫农 95339 Yunong 95339 | 河南 Henan | a | 1.2 | 155 | PH82-2-2 | 山东 Shandong | b | 1.4 |
| 114 | 郑州 81-1 Zhongzhou 81-1 | 河南 Henan | a | 1.3 | 156 | 山农 413863 Shannong 413863 | 山东 Shandong | b | 1.8 |
| 115 | 郑州 992 Zhongzhou 992 | 河南 Henan | a | 2.8 | 157 | 鲁麦 23 Lumai 23 | 山东 Shandong | a | 1.7 |
| 116 | 郑州 974 Zhongzhou 974 | 河南 Henan | a | 1.4 | 158 | 鲁 95(6)161 Lu 95(6)161 | 山东 Shandong | a | 1.8 |
| 117 | 丰优 6 号 Fengyou 6 | 河南 Henan | a | 1.6 | 159 | 鲁麦 22 Lumai 22 | 山东 Shandong | a | 1.9 |
| 118 | 豫麦 28 号 Yumai 28 | 河南 Henan | a | 1.8 | 160 | 白玉 149 Baiyu 149 | 山东 Shandong | a | 1.1 |
| 119 | 豫麦 57 号 Yumai 57 | 河南 Henan | a | 1.3 | 161 | 山东 955159 Shandong 955159 | 山东 Shandong | a | 2.0 |
| 120 | 豫麦 47 号 Yumai 47 | 河南 Henan | a | 1.9 | 162 | 山东 924402-6 Shandong 924402-6 | 山东 Shandong | a | 1.7 |
| 121 | 豫麦 62 号 Yumai 62 | 河南 Henan | a | 2.1 | 163 | 山东 928802 Shandong 928802 | 山东 Shandong | a | 2.1 |
| 122 | 关封 2 号 Guanfeng 2 | 河南 Henan | b | 1.2 | 164 | 山东 94(6)006 Shandong 94(6)006 | 山东 Shandong | b | 1.3 |
| 123 | 豫麦 50 号 Yumai50 | 河南 Henan | b | 2.3 | 165 | 烟农 18 Yannong 18 | 山东 Shandong | a | 2.7 |
| 124 | 丰优 7 号 Fengyou 7 | 河南 Henan | b | 0.8 | 166 | 烟农 19 Yannong 19 | 山东 Shandong | a | 1.1 |
| 125 | 郑麦 9023 Zhengmai 9023 | 河南 Henan | b | 0.9 | 167 | 烟辐 188 Yanfu 188 | 山东 Shandong | a | 1.2 |
| 126 | 濮优 9175 Puyou 9175 | 河南 Henan | a | 1.1 | 168 | 烟 475 Yan 475 | 山东 Shandong | a | 0.9 |

续表 1 Continued from table 1

| 编号 Code | 品种 Cultivar | 来源 Origin | 等位 基因 Allele | 黄色素含量 YP content (mg·kg ⁻¹) | 编号 Code | 品种 Cultivar | 来源 Origin | 等位 基因 Allele | 黄色素含量 YP content (mg·kg ⁻¹) |
|------------|---------------------------|--------------|--------------------|---|------------|-----------------------------|--------------|--------------------|---|
| 169 | 烟 99-5 Yan 99-5 | 山东 Shandong | a | 1.0 | 194 | 99G80 | 山西 Shanxi | a | 3.1 |
| 170 | 烟 239 Yan 239 | 山东 Shandong | a | 1.5 | 195 | 99G46 | 山西 Shanxi | a | 2.0 |
| 171 | 烟农 15 Yannong 15 | 山东 Shandong | a | 1.8 | 196 | 运 97169 Yun 97169 | 山西 Shanxi | a | 3.4 |
| 172 | 烟 2801 Yan 2801 | 山东 Shandong | a | 2.7 | 197 | 运丰早 101 Yunfengzao 101 | 山西 Shanxi | b | 1.2 |
| 173 | 晋农 216 Jinnong 216 | 山西 Shanxi | a | 1.2 | 198 | 运丰早 898 Yunfengzao 898 | 山西 Shanxi | b | 1.5 |
| 174 | 晋农 207 Jinnong 207 | 山西 Shanxi | a | 1.4 | 199 | 陕 302518 Shan 02518 | 陕西 Shaanxi | a | 2.4 |
| 175 | 晋农 215 Jinnong 215 | 山西 Shanxi | a | 1.5 | 200 | 陕 354 Shan 54 | 陕西 Shaanxi | a | 2.7 |
| 176 | 晋农 218 Jinnong 218 | 山西 Shanxi | a | 2.3 | 201 | 陕 93302 Shan 93302 | 陕西 Shaanxi | a | 1.8 |
| 177 | 晋麦 45 Jinmai 45 | 山西 Shanxi | a | 1.7 | 202 | 陕 623 Shan 23 | 陕西 Shaanxi | a | 2.2 |
| 178 | 晋麦 50 Jinmai 50 | 山西 Shanxi | a | 2.0 | 203 | 陕 229 Shan 229 | 陕西 Shaanxi | b | 1.3 |
| 179 | 晋麦 60 Jinmai 60 | 山西 Shanxi | a | 2.0 | 204 | 陕优 225 Shanyou 225 | 陕西 Shaanxi | b | 1.4 |
| 180 | 晋麦 61 Jinmai 61 | 山西 Shanxi | b | 1.9 | 205 | 陕 253 Shan 253 | 陕西 Shaanxi | b | 1.8 |
| 181 | 晋麦 67 Jinnong 67 | 山西 Shanxi | b | 1.1 | 206 | 陕 150 Shan 150 | 陕西 Shaanxi | b | 0.9 |
| 182 | 临汾 125 Linfen 125 | 山西 Shanxi | a | 2.2 | 207 | 陕 898-33 Shan 98-33 | 陕西 Shaanxi | b | 1.2 |
| 183 | 临汾 5232 Linfen 5232 | 山西 Shanxi | a | 2.2 | 208 | 陕 9314 Shan 314 | 陕西 Shaanxi | b | 1.4 |
| 184 | 临汾 98-6269 Linfen 98-6269 | 山西 Shanxi | a | 1.0 | 209 | 陕 160 Shan 160 | 陕西 Shaanxi | b | 1.7 |
| 185 | 临旱 917 Linhan 917 | 山西 Shanxi | a | 1.2 | 210 | 西农 1163-20 Xinong 1163-20 | 陕西 Shaanxi | a | 1.4 |
| 186 | 临旱 619 Linhan 619 | 山西 Shanxi | a | 1.5 | 211 | 西农 8925-13 Xinong 8925-13 | 陕西 Shaanxi | a | 1.3 |
| 187 | 临旱 6114 Linhan 6114 | 山西 Shanxi | a | 1.7 | 212 | N9209-3 | 陕西 Shaanxi | a | 2.3 |
| 188 | 临丰 615 Linfeng 615 | 山西 Shanxi | a | 1.7 | 213 | 西农 12208019 Xinong 12208019 | 陕西 Shaanxi | b | 1.7 |
| 189 | 临优 1583 Linyou 1583 | 山西 Shanxi | a | 1.8 | 214 | 西农 336 Xinong 336 | 陕西 Shaanxi | b | 0.5 |
| 190 | 临汾 127 Linfen 127 | 山西 Shanxi | a | 2.2 | 215 | 西农 6426 Xinong 6426 | 陕西 Shaanxi | b | 0.8 |
| 191 | 临汾 133 Linfen 133 | 山西 Shanxi | b | 1.2 | 216 | 中梁 88375 Zhongliang 88375 | 甘肃 Gansu | b | 2.9 |
| 192 | 临汾 137 Linfen 137 | 山西 Shanxi | b | 1.1 | 217 | 中梁 88303 Zhongliang 88303 | 甘肃 Gansu | b | 1.8 |
| 193 | 99G66 | 山西 Shanxi | a | 2.9 | | | | | |

等位基因“a”代表 *Psy-A1a*, 对应 194 bp 的条带; 等位基因“b”代表 *Psy-A1b*, 对应 231 bp 的条带

Allele “a” for *Psy-A1a* with the 194-bp PCR fragment and allele “b” for *Psy-A1b* with the 231-bp PCR fragment

荡浸提 1 h, 静置、离心, 在分光光度计 440 nm 波长处测定吸光度。测定结果为黄色素总含量 (mg·kg⁻¹)。

1.3 基因组 DNA 提取

每个品种选取 3 粒种子, 按 Lagudah 等^[21]方法分别提取籽粒基因组 DNA。

1.4 STS 标记检测

Psy-A1 基因标记 *YP7A* 由 He 等^[19]开发。*YP7A-F* 序列为 5'-GGACCTTGCTGATGACCGAG-3', *YP7A-R* 序列为 5'-TGACGGTCTGAAGTGAGAATGA-3'。PCR 反应体系 20 μl, 含 20 mmol·L⁻¹ Tris-HCl (pH 8.4), 25 mmol·L⁻¹ KCl, 0.2 mmol·L⁻¹ dNTPs, 1.5 mmol·L⁻¹ MgCl₂, 每条引物 5 pmol, Taq DNA 聚合酶 1 U, 模板 DNA 80 ng。反应程序为 95 °C 预变性 5 min; 95 °C 变性 30 s, 65 °C 退火 30 s, 72 °C 延伸 30 s, 35 个循环;

最后 72 °C 延伸 5 min。

PCR 扩增产物以 2.0% 的琼脂糖凝胶电泳分离检测, 缓冲液体系为 1×TAE 溶液, 200 V 电压电泳 35 min, 溴化乙锭染色后, 用 GelDoc XR System 扫描成像并存入计算机。扩增产物也可用 6% 的变性聚丙烯酰胺电泳分离检测, 100 W 恒定功率预电泳 30 min, 温度上升到 35 °C 时, 加变性后的扩增产物 4 μl, 60 W 恒功率电泳 1 h, 银染显带。根据每个品种 3 个籽粒 DNA 的检测结果判断该品种 (系) 的等位变异类型。

1.5 统计分析

利用 Excel 图表工具分析 *Psy-A1* 基因等位变异频率与黄色素含量的关系; 以 SAS (Statistical Analysis System) 软件 9.0 版本对 *Psy-A1* 基因不同等位变异的黄色素含量进行 T 测验。

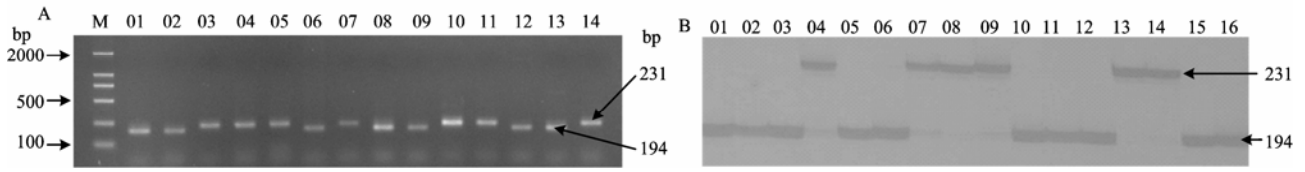
2 结果与分析

2.1 黄色素含量等位变异类型

标记 *YP7A* 在检测的冬小麦品种(系)中表现出多态性,在一部分品种(系)中扩增出 194 bp 的片段,而在另一些品种(系)中扩增出 231 bp 的条带,对应的等位基因分别以 *Psy-A1a* 和 *Psy-A1b* 表示(GenBank

编号分别为 EF600063 和 EF600064)(表 1 和图 1)。在 217 份冬小麦品种(系)中扩增出 *Psy-A1a* 和 *Psy-A1b* 等位变异的频率分别为 62.2%和 37.8%。*Psy-A1a* 的高分布频率说明中国大部分冬小麦品种(系)黄色素含量较高,不符合馒头、面条等传统食品的白度要求,降低小麦品种黄色素含量是品质育种的重要目标。

2.2 *YP7A* 扩增条带类型与黄色素含量的关系



A, 以 2.0%琼脂糖凝胶电泳检测 *YP7A* 的多态性。M: DNA ladder 2000; 01: CA9632; 02: 中优 9507; 03: 小偃 54; 04: 农大 116; 05: 晋麦 61; 06: 冀 3475; 07: 郑麦 9023; 08: 豫麦 28; 09: 鲁麦 23; 10: 山农 60182; 11: 陕 229; 12: 皖麦 38; 13: 云麦 44; 14: 川 89-107; B, 以 6%变性聚丙烯酰胺凝胶检测 *YP7A* 的多态性, 01: CA9632; 02: 中麦 9 号; 03: 河农 2552; 04: 宁 9548; 05: 云麦 44; 06: 晋农 218; 07: 徐 858; 08: 陕 150; 09: 西农 6426; 10: 临汾 125; 11: 99G66; 12: 运 97169; 13: 扬麦 158; 14: 中梁 88375; 15: 晋麦 60; 16: 绵阳 26
Panel A showed the polymorphic test on a 2% agarose gel. M: DNA ladder DL2000; 01: CA9632; 02: Zhongyou 9507; 03: Xiaoyan 54; 04: Nongda 116; 05: Jinmai 61; 06: Ji 3475; 07: Zhengmai 9023; 08: Yumai 28; 09: Lumai 23; 10: Shannong 60182; 11: Shaan 229; 12: Wanmai 38; 13: Yunmai 44; 14: Chuan 89-107; Panel B was the polymorphic test on a 6% denaturing polyacrylamide gel. 01: CA9632; 02: Zhongmai 9; 03: Henong 2552; 04: Ning 9548; 05: Yunmai 44; 06: Jinnong 218; 07: Xu 858; 08: Shaan 150; 09: Xinong 6426; 10: Linfen 125; 11: 99G66; 12: Yun 97169; 13: Yangmai 158; 14: Zhongliang 88375; 15: Jinmai 60; 16: Mianyang 26

图 1 小麦品种黄色素标记 *YP7A* 的多态性

Fig. 1 Polymorphic test of PCR fragments amplified with *YP7A* in Chinese cultivars

将表 1 结果汇总为表 2 可以看出,含有 194 bp 片段的材料大多黄色素含量较高,平均为 1.8 mg·kg⁻¹;

含有 231 bp 片段的材料黄色素含量相对较低,平均为 1.3 mg·kg⁻¹; T 测验表明(表 2),两种基因型黄色素

表 2 *Psy-A1* 基因不同等位变异黄色素含量 T 测验

Table 2 T test of YP content between the cultivars with different alleles of *Psy-A1* gene

| 等位基因 | 品种数 | 频率 | 黄色素含量 | 标准差 | 变化范围 |
|----------------|---------------------|---------------|-----------------|--------------------|---------|
| Allele | Number of accession | Frequency (%) | Mean YP content | Standard deviation | Range |
| <i>Psy-A1a</i> | 135 | 62.2 | 1.8a | 0.6 | 0.6~3.4 |
| <i>Psy-A1b</i> | 82 | 37.8 | 1.3b | 0.4 | 0.4~2.9 |

不同字母表示差异达显著水平 ($P < 0.01$)

Different letters following grain YP content indicate significant differences at the 0.01 probability level

含量平均值的差异达到极显著水平 ($P < 0.01$)。

在 217 份冬小麦品种(系)中 *Psy-A1a* 基因型的黄色素含量在 0.6~3.4 mg·kg⁻¹, *Psy-A1b* 基因型的黄色素含量在 0.4~2.9 mg·kg⁻¹; 且随着黄色素含量的提高,等位基因 *Psy-A1a* 的频率逐渐升高,而 *Psy-A1b* 的频率逐渐下降(图 2)。

2.3 不同冬麦区小麦品种(系)黄色素含量分布规律

表 3 表明,以 *YP7A* 标记检测中国 217 份冬小麦品种(系),北方冬麦区、黄淮冬麦区、长江中下游冬麦区和西南冬麦区含 *Psy-A1a* 等位基因品种(系)的频率分别为 75.0%、72.0%、25.9%和 33.3%,平均黄色素含量分别为 1.8、1.7、1.4、1.2 mg·kg⁻¹。其中,黄色素含量最高的 10 个品种(系)是运 97169、山农

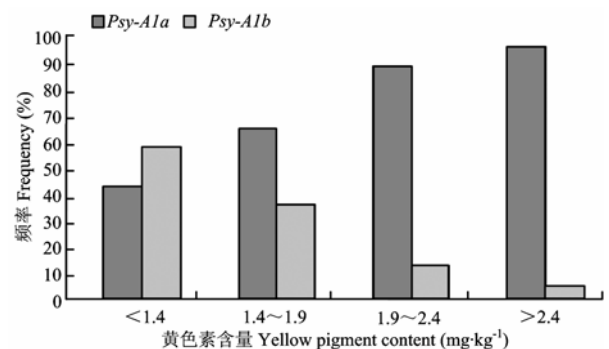


图 2 中国冬小麦品种(系)不同黄色素含量与 *Psy-A1* 基因等位变异的关系

Fig. 2 Association between allelic variations of *Psy-A1* gene and different YP content in Chinese winter wheat cultivars (lines)

表 3 不同冬麦区小麦 *Psy-A1* 基因等位变异类型分布频率
Table 3 Occurrence frequency of *Psy-A1* allelic variation in different winter wheat regions in China

| 冬麦区 Winter wheat region | 品种数 Number of accession | 分布频率 Occurrence frequency (%) | |
|----------------------------|-------------------------------|----------------------------------|----------------|
| | | <i>Psy-A1a</i> | <i>Psy-A1b</i> |
| 北部冬麦区 NWR | 48 | 75.0 | 25.0 |
| 黄淮冬麦区 YHRFWWR | 118 | 72.0 | 28.0 |
| 长江中下游冬麦区 MLYVWWR | 27 | 25.9 | 74.1 |
| 西南冬麦区 SWWR | 24 | 33.3 | 66.7 |

NWR: Northern Winter Wheat Region; YHRFWWR: Yellow & Huai Facultative Winter Wheat Region; MLYVWWR: Middle & Lower Yangtze River Winter Wheat Region; SWWR: Southwestern Winter Wheat Region

1355、农大 3291、99G80、CA9648、中梁 88375、99G66、98 中 18、徐州 826、山农 664；黄色素含量最低的 10 个品种（系）是宁 97-18、西农 336、鄂 86642、淮麦 16、绵阳 940112、绵阳 960107、川 89-107、皖麦 18、皖麦 33、冀 5066。低黄色素品种可作为面粉颜色改良的育种亲本。

3 讨论

基因功能标记的开发与应用是小麦分子育种的重要方向^[22]。先前在黄色素含量的 QTL 定位中发现了一些与基因紧密连锁的 SSR、AFLP 或 SCAR 标记^[7,10,12,13]，但这些标记都与 *Psy* 基因有一定距离，如 Parker 等^[7]发现一个与 7A 染色体上黄色素含量基因紧密连锁的 AFLP 标记 *Xwua26-7A*，并随后将其转化为 STS 标记^[23]。但 Sharp 等^[24]认为该标记只能对与定位亲本来源相同的材料起到标记作用，而与其它许多品种的黄色素含量几乎没有关系，因而不具有普遍适用性。本研究利用的分子标记 *YP7A* 是依据小麦 7A 染色体 *Psy-A1* 基因序列开发的功能标记，与目标基因共分离，稳定性好；利用其检测小麦品种（系）*Psy-A1* 基因的等位变异，扩增带型清晰易读，可作为黄色素含量辅助选择的实用性标记。

利用 *YP7A* 标记检测中国 217 份冬小麦品种（系）*Psy-A1* 基因，含有 *Psy-A1a* 的材料黄色素含量大多较高，含有 *Psy-A1b* 的材料黄色素含量大多较低。但也有一些材料例外，如绵阳 26、云麦 46、京 9428、豫麦 25、山农 990525、烟 475、济麦 1 号、皖麦 18、鄂 86642 等含有等位基因 *Psy-A1a*，但其黄色素含量较低；而云麦 39、农大 99-5009、晋麦 61、沧核 030、山农 2013、陕 253、陕 160、运丰早 898、引 11-12 等材料含有等位基因 *Psy-A1b*，但黄色素含量偏高。其

原因是小麦黄色素含量受多个位点调控，除 7A 染色体上的 *Psy-A1* 基因外，在 7B 和其它染色体上也存在控制黄色素含量的 QTL^[7,10-16]；此外，1B/1R 易位对黄色素含量也有重要影响，可解释 30% 的表型变异（本实验室资料，尚未发表）。尽管如此，本研究结果显示，7A 染色体上的 *Psy-A1* 基因对小麦黄色素含量影响很大，2 等位基因 *Psy-A1a* 和 *Psy-A1b* 与黄色素含量相关显著。

通过对中国 217 份冬小麦品种（系）*Psy-A1* 基因的等位变异及黄色素含量分析，不同冬麦区小麦黄色素含量存在较大差异，其中，北方冬麦区和黄淮海麦区小麦黄色素含量高，而长江中下游麦区及西南麦区黄色素含量低。主要原因有两个，一是上述麦区小麦品种 *Psy-A1a* 和 *Psy-A1b* 等位基因的分布频率差异较大，北方冬麦区和黄淮海麦区含高黄色素等位基因 *Psy-A1a* 的频率分别为 75.0% 和 72.0%，而长江中下游麦区和西南麦区 *Psy-A1a* 的频率仅为 25.9% 和 33.3%；二是 1B/1R 易位系对黄色素含量的影响，中国 20 世纪 80 年代后育成的小麦品种中约 37.8% 携带 1B/1R 易位，其中北方冬麦区和黄淮冬麦区频率较高，分别为 59.1% 和 41.7%；而长江中下游冬麦区和西南冬麦区频率较低，均为 20.0%^[25]。此外，检测的 217 份冬小麦品种（系）间黄色素含量相差 1-10 倍，说明黄色素含量选择潜力大，有利于培育符合中国传统食品面条、馒头所需的低黄色素品种，提高中国小麦面粉的白度。

4 结论

YP7A 是小麦 7A 染色体上影响黄色素含量的 *Psy-A1* 基因的功能标记，与 *Psy-A1* 基因共分离。利用 *YP7A* 对 217 份中国小麦品种检测结果表明，该标记可以准确鉴定 *Psy-A1* 基因的等位变异，PCR 条带清晰，稳定性好，是对小麦黄色素含量进行分子标记辅助选择的有效工具。

References

- [1] Kruger J E, Matsuo R R, Preston K. A comparison of methods for the prediction of Cantonese noodle colour. *Canadian Journal of Plant Science*, 1992, 72: 1021-1029.
- [2] Oliver J R. Proceedings of the 38th Australian Cereal Chemistry Conference, Royal Australian Chemical Institute, Parkville, Victoria, Australia, 1988: 216-218.
- [3] Symons S J. Computer analysis of fluorescence for the measurement

- of flour refinement as determined by flour ash content, flour grade colour, and tristimulus colour measurements. *Cereal Chemistry*, 1991, 68: 454-460.
- [4] He Z H, Yang J, Zhang Y, Quail K J, Peña R J. Pan bread and dry white Chinese noodle quality in Chinese winter wheats. *Euphytica*, 2004, 139: 257-267.
- [5] 杨 金, 张 艳, 何中虎, 阎 俊, 王德森, 刘建军, 王美芳. 小麦品质性状与面包和面条品质关系分析. *作物学报*, 2004, 30: 739-744.
- Yang J, Zhang Y, He Z H, Yan J, Wang D S, Liu J J, Wang M F. Association between wheat quality traits and performance of pan bread and dry white Chinese noodle. *Acta Agronomica Sinica*, 2004, 30(8): 739-744. (in Chinese)
- [6] Baik B K, Czuchajowska Z, Pomeranz Y. Discoloration of dough for oriental noodles. *Cereal Chemistry*, 1995, 72: 198-205.
- [7] Parker G D. Mapping loci associated with flour color in wheat. *Theoretical and Applied Genetics*, 1998, 97: 238-245.
- [8] Miskelly D M. Flour components affecting paste and noodle colour. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1984, 35: 463-471.
- [9] Clarke F R, Clarke J M, Mc Caig T N, Knox R E, Depauw R M. Inheritance of yellow pigment concentration in seven durum wheat crosses. *Canadian Journal of Plant Science*, 2006, 86: 133-141.
- [10] Mares D J, Campbell A W. Mapping components of flour and noodle colour in Australian wheat. *Australian Journal of Agricultural Research*, 2001, 52: 1297-1309.
- [11] 张立平, 阎 俊, 夏先春, 何中虎, Sutherland M W. 普通小麦籽粒黄色素含量的 QTL 分析. *作物学报*, 2006, 32: 41-45.
- Zhang L P, Yan J, Xia X C, He Z H, Sutherland M W. QTL mapping for kernel yellow pigment content in common wheat. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32: 41-45. (in Chinese)
- [12] Kuchel H, Langridge P, Mosionek L, Williams K, Jefferies S P. The genetic control of milling yield, dough rheology and baking quality of wheat. *Theoretical and Applied Genetics*, 2006, 112: 1487-1495.
- [13] Elouafi I, Nachit M M, Martin L M. Identification of a microsatellite on chromosome 7B showing a strong linkage with yellow pigment in durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. durum). *Hereditas*, 2001, 135: 255-261.
- [14] Pozniak C J, Knox R E, Clarke F R, Clarke J M. Identification of QTL and association of a phytoene synthase gene with endosperm colour in durum wheat. *Theoretical and Applied Genetics*, 2007, 114: 525-537.
- [15] Ma W, Daggard G, Sutherland M, Brennan P. Molecular markers for quality attributes in wheat. In: Proceedings of the Ninth Assembly Wheat Breeding Society of Australia, 1999: 115-117.
- [16] Hessler T G, Thomson M J, Benscher D, Nachit M M, Sorrells M E. Association of a lipoxygenase locus, *Lpx-B1*, with variation in lipoxygenase activity in durum wheat seeds. *Crop Science*, 2002, 42: 1695-1700.
- [17] Belitz H D, Grosch W. *Food Chemistry*. Berlin: Springer Verlag, 1987.
- [18] 朱长甫, 陈 星, 王英典. 植物类胡萝卜素生物合成及其相关基因在基因工程中的应用. *植物生理与分子生物学报*, 2004, 30: 609-618.
- Zhu C F, Chen X, Wang Y D. Carotenoid biosynthesis in plants and application of its relative genes in gene engineering. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 2004, 30: 609-618. (in Chinese)
- [19] He X Y, Zhang Y L, He Z H, Wu Y P, Xiao Y G, Ma C X, Xia X C. Characterization of a phytoene synthase 1 gene (*Psy1*) located on common wheat chromosome 7A and development of a functional marker. *Theoretical and Applied Genetics*, 2008, 116: 213-221.
- [20] AACC. *Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists* (9th ed). MN, St. Paul, USA, 1995.
- [21] Lagudah E S, Appels R, McNeil D. The *Nor-D3* locus of *Triticum tauschii*: natural variation and genetic linkage to markers in chromosome 5. *Genome*, 1991, 34: 387-395.
- [22] Bagge M, Xia X C, Lübberstedt T. Functional markers in wheat. *Current Opinion in Plant Biology*, 2007, 10: 211-216
- [23] Parker G D. Development of a STS marker linked to a major locus controlling flour colour in wheat. *Molecular Breeding*, 2000, 6: 169-174.
- [24] Sharp P J, Johnston S, Brown G, McIntosh R A, Pallotta M, Carter M, Bariana H S, Khatkar S, Lagudah E S, Singh R P, Khairallah M, Potter R, Jones M G K. Validation of molecular markers for wheat breeding. *Australian Journal of Agricultural Research*, 2001, 52: 1357-1366.
- [25] 周 阳, 何中虎, 张改生, 夏兰琴, 陈新民, 高永超, 井赵斌, 于广军. 1BL/1RS 易位系在我国小麦育种中的应用. *作物学报*, 2004, 30: 531-535.
- Zhou Y, He Z H, Zhang G S, Xia L Q, Chen X M, Gao Y C, Jing Z B, Yu G J. Utilization of 1BL/ 1RS translocation in wheat breeding in China. *Acta Agronomica Sinica*, 2004, 30: 531-535. (in Chinese)

(责任编辑 于 竞)